

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПЛАВКИ НА ПРОЦЕССЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА

С.В. Филатов¹, С.А. Загайнов², Л.Ю. Гилева², К.Б. Пыхтеева²

¹ОАО «НЛМК» (г. Липецк, Россия)

²ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
(г. Екатеринбург, Россия)

Рассмотрены термодинамика и кинетика восстановления оксидов железа во взаимосвязи с интенсивностью доменной плавки. Разработана методика оценки изменения степени использования монооксида углерода при изменении интенсивности доменной плавки. Адекватность модели подтверждается сопоставлением результатов моделирования и производственных данных о работе доменных печей объемом 2200 и 3200 м³. Показано, что при высокой степени развития процессов косвенного восстановления изменение интенсивности плавки будет сопровождаться существенными колебаниями теплового состояния.

Ключевые слова: интенсивность доменной плавки, степень косвенного восстановления, термодинамика и кинетика восстановления оксидов железа, время пребывания материалов в печи.

This article present the study relationship between thermodynamics and kinetics of iron oxide reduction and production intensity. Model equations was developed for assessing changes in degree of the use of carbon monoxide at change in production intensity. Industrial datas of blast furnace production with the useful volume of 2000 m³ and 3200 m³ confirmed the adequacy of the developed model. Found that at high degree of developmental reproduction processes, the change in production intensity is accompanied by unsteady thermal state.

Keywords: production intensity, degree of indirect reduction, thermodynamics and kinetics of iron oxide reduction, production time.

Влияние интенсивности доменной плавки на процесс косвенного восстановления оксидов железа общепризнанно. В частности, в работе [1] дается качественный анализ влияния условий плавки на степень развития реакции косвенного восстановления.

Целью выполненного исследования является разработка математической модели для оценки влияния интенсивности плавки на степень использования восстановительного потенциала монооксида углерода, которая во многом определяет развитие реакций прямого восстановления.

Известно, что большинство восстановительных реакций в доменной печи не достигают равновесия. Влияние времени восстановления на отклонение концентрации продуктов реакции от равновесной выражается через скорость реакции [2]:

$$v = \frac{dx}{d\tau} = k(x - x_p) = e^{k\tau}, \quad (1)$$

где v – скорость химической реакции, моль/л·сек; x – концентрация вещества, моль/л; x_p – равновесная концентрация, моль/л; τ – время, с; k – константа скорости реакции, с⁻¹.

Интегрирование данного выражения позволяет получить зависимость отклонения концентрации вещества относительно равновесной от времени протекания реакции:

$$\int_{x_p}^x \frac{dx}{x - x_p} = k \int_0^{\tau} d\tau, \quad (2)$$

или

$$x - x_p = e^{k\tau}. \quad (3)$$

При переходе к контролируемому технологическому показателю, характеризующему развитие реакции косвенного восстановления – степени использования монооксида углерода, уравнение (3) примет вид

$$\eta_{CO} = \eta_{CO}^p (1 - e^{k\tau}), \quad (4)$$

где η_{CO}^p – равновесная степень использования монооксида углерода, доли единиц, τ – время пребывания материала в зоне восстановления, с.

Расчет степени использования монооксида углерода производится с использованием метода натурно-математического моделирования [3]. После линеаризации уравнения (4) получим

$$\frac{\Delta\eta_{CO}}{\eta_{CO}} = \frac{\Delta\eta_{CO}^p}{\eta_{CO}^p} - \frac{e^{k\tau}}{1 - e^{k\tau}} (k\Delta\tau + \Delta k\tau). \quad (5)$$

Для расчета входящей в уравнение (5) константы скорости реакции привлекаются практические данные о работе печи

$$k = \frac{\ln(\eta_{CO} - \eta_{CO}^p)}{\tau}. \quad (6)$$

Принимая допущение о постоянстве константы скорости реакции в области рабочих режимов уравнение (6) принимает вид

$$\Delta\eta_{CO} = \frac{\eta_{CO}}{\eta_{CO}^p} \Delta\eta_{CO}^p - \eta_{CO} \frac{ke^{k\tau}}{1 - e^{k\tau}} \Delta\tau. \quad (7)$$

Первое слагаемое позволяет учесть влияние на степень развития реакции косвенного восстановления термодинамических факторов, второе слагаемое – кинетических факторов. Влияние как термодинамического, так и кинетического фактора в большей степени проявляется при высокой фактической степени использования монооксида углерода, т. е. при использовании в шихте агломерата высокого качества и оптимального распределения рудной нагрузки по радиусу печи.

Данное уравнение позволяет оценить влияние технологических факторов – давления и интенсивности плавки при конкретных условиях работы печи на ход восстановительных процессов.

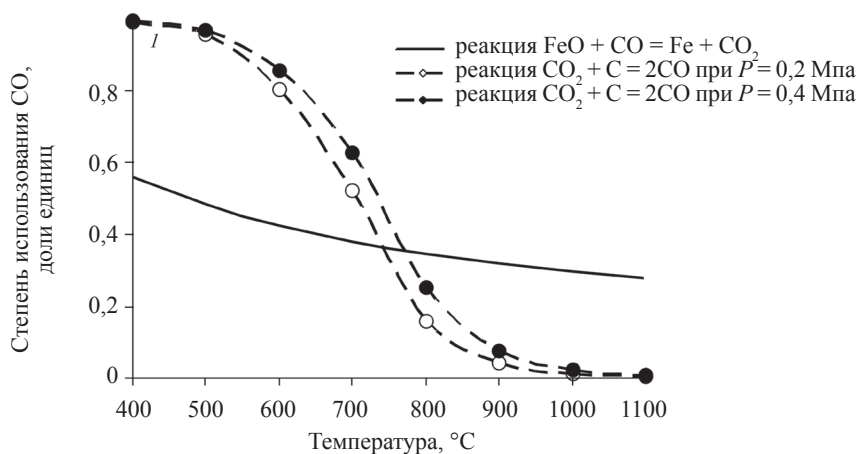


Рис. 1. Зависимость равновесной степени использования углерода от температуры и давления

Анализ термодинамического равновесия реакций $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$ и $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$, выполненный по известным зависимостям констант равновесия реакций от давления и температуры [4, 5], позволяет оценить влияние технологических факторов на равновесную степень использования монооксида углерода (рис. 1).

При построении диаграммы рассматривались константы равновесия реакций газификации углерода, находящегося в аморфном состоянии и в виде графита. При температурах 800–1100 °C относительное отклонение численных значений констант равновесия не превышает 2 % (отн.).

Учитывая, что бесконусный грузочный аппарат позволяет работать с избыточным давлением газа под колошником до 0,25 МПа, при этом давление в зоне начала интенсивного развития реакции прямого восстановления монооксида железа достигает 0,4 МПа, рассматривали равновесие реакций восстановления в диапазоне 0,2–0,4 МПа.

Обработка приведенной на рис. 1 зависимости показала, что в интервале температуры 800–900 °C повышение давления на 0,01 МПа приводит к повышению равновесной степени использования монооксида углерода на 0,002 доли единиц.

Повышение давления кроме того приводит к смещению границы начала развития реакций прямого восстановления в область более высоких температур, что в свою очередь приводит к увеличению зоны косвенного восстановления и увеличению времени пребывания материала в этой зоне:

$$\tau_{\text{KB}} = \frac{h_{\text{KB}}}{v_{\text{KB}}}, \quad (8)$$

где τ_{KB} — время пребывания материала в зоне косвенного восстановления, с; h_{KB} — высота зоны косвенного восстановления, м; v_{KB} — скорость движения материалов в зоне косвенного восстановления, м/с.

Принимая допущение о пропорциональности изменения скорости движения материалов в зоне косвенного восстановления общей скорости движения материалов и, следовательно, времени пребывания материалов в печи, после линеаризации уравнения (8) получим:

$$\frac{\Delta\tau_{\text{КВ}}}{\tau_{\text{КВ}}} = \frac{\Delta h_{\text{КВ}}}{h_{\text{КВ}}} + \frac{\Delta\tau}{\tau}, \quad (9)$$

где τ – время пребывания материала в печи, с.

Изменение высоты зоны косвенного восстановления рассчитывается по известной методике [3, 5, 6]. Оценочные расчеты относительного изменения высоты зоны косвенного восстановления при увеличении давления на 0,01 МПа на 0,0025 показали, что определяющим фактором является изменение времени пребывания материалов в печи, зависящее от ее суточной производительности:

$$\tau = \frac{V_0}{P\gamma_{\text{ш}}}, \quad (10)$$

где V_0 – объем зоны косвенного восстановления, м³; P – суточная производительность печи, т/с; $\gamma_{\text{ш}}$ – удельный объем шихты, м³/т чугуна.

Снижение производительности доменной печи приводит к увеличению времени пребывания шихты в печи и, следовательно, к увеличению времени пребывания ЖРМ в зоне косвенного восстановления. Поэтому возможно увеличение степени косвенного восстановления, и, следовательно, снижение степени прямого восстановления за счет кинетики восстановления.

Приведенная выше методика может быть использована для прогнозной оценки эффективности технологических мероприятий, направленных на изменение интенсивности доменной плавки.

Приведенные на рис. 2 и 3 результаты сопоставления расчетных и фактических зависимостей между интенсивностью плавки и степенью использования монооксида углерода для доменных печей объемом 2200 и 3200 м³ подтверждают адекватность методики.

Суммарный эффект изменения степени использования монооксида углерода, который определяется влиянием времени пребывания шихты в зоне косвенного восстановления и изменением равновесия реакции $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ при снижении производительности на 10 % составляет 0,020–0,025. При таком изменении степени использования монооксида углерода приведет к увеличению удельного расхода кокса на 9–12 кг/т чугуна.

Результаты теоретических исследований и анализ производственных данных показали существенное влияние давления на развитие реакций косвенного восстановления монооксида железа, а следовательно, и на удельный расход кокса. При высокой степени развития процессов косвенного восстановления изменение интенсивности плавки будет сопровождаться существенными колебаниями теплового состояния.

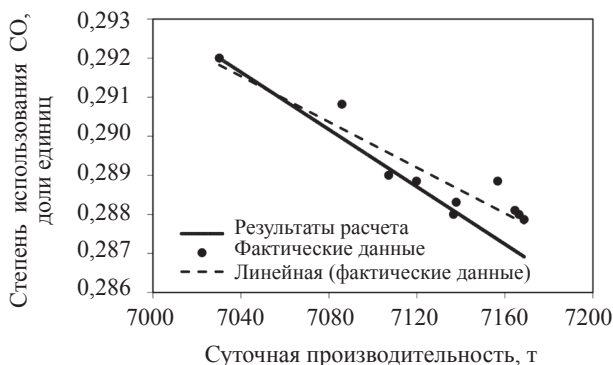
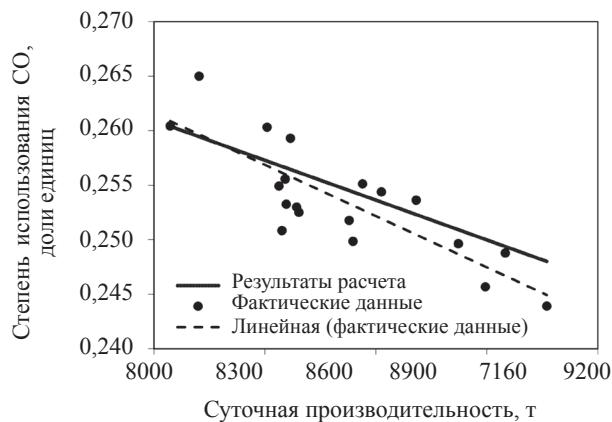


Рис. 3. Сопоставление расчетных и фактических зависимостей между интенсивностью плавки и степенью использования монооксида углерода для доменной печи объемом 3200 м³



Выводы

Разработан подход к анализу восстановления оксидов железа при изменении интенсивности плавки. Анализ результатов моделирования и фактических данных о работе доменных печей показал значимость данного фактора и необходимость его учета при выборе технологического режима при заданном изменении производства.

Список использованных источников

1. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы. – Днепропетровск: Пороги, 2003. – 596 с.
2. Китаев Б.И., Тимофеев В.Н., Боковиков Б.А., и др. Тепло- и массообмен в плотном слое. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.
3. Спиринов Н.А., Ипатов Ю.В., Лобанов В.И., Краснобаев В.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю., Швыдкий В.С., Загайнов С.А., Онорин О.П. Информационные системы в металлургии. – Екатеринбург: Уральский государственный технический университет, 2001. – 617 с.
4. Доменное производство: Справочное издание / Под ред. Е.Ф. Вегмана. Т. 1. – М.: Металлургия, 1989. – 486 с.
5. Shen W., Wu S.L., Zhang L.H., Wu J., Xu J., and Kou M.Y. 6th Int. Congress of the Science and technology of Ironmaking // Real-time estimate of blast furnace theoretical combustion temperature based on the variation of gas utilization rate and coke ratio. 2012. С. 366–372.
6. Шаврин С.В., Ченцов А.В. К расчету высоты ступеней теплообмена в доменных печах // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1960. – № 11. – С. 27–31.